

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta mechatroniky a mezioborových inženýrských studií

Studijní program: B2612 – Elektrotechnika a informatika

Studijní obor: 2612R011 – Elektronické informační a řídicí systémy

Studium piezoelektrických kruhových bimorfů pomocí interferometru

Study of piezoelectric circular bimorphs by interferometer

Bakalářská práce

Autor: **Lukáš Franc**

Vedoucí bakalářské práce: Doc. RNDr. Miroslav Šulc, Ph.D.

Konzultant: Doc. Mgr. Jiří Erhart, Ph.D.

V Liberci 18.5. 2006

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta mechatroniky a mezioborových inženýrských studií

Katedra: fyziky

Akademický rok: 2005/2006

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Jméno a příjmení: Lukáš Franc

studijní program: B 2612 – Elektrotechnika a informatika

obor: 2612R011 – Elektronické informační a řídicí systémy

Vedoucí katedry Vám ve smyslu zákona o vysokých školách č.111/1998 Sb. určuje tuto bakalářskou práci:

Název tématu:

Studium piezoelektrických kruhových bimorfů pomocí interferometru

Zásady pro vypracování:

1. Seznamte se s vlastnostmi feroelektrických (piezoelektrických) keramik a způsoby jejich polarizace, s návrhem a vlastnostmi kruhových bimorfů
2. Sestavte sadu heterogenních kruhových bimorfů z připravených polotovarů
3. Navrhněte a sestavte Twyman-Greenův interferometr
4. Určete průhyb bimorfů z interferenčního obrazu
5. Pro vybrané bimorfy změřte jejich průhyb i skenováním jejich povrchu pomocí Michelsonova interferometru a výsledky obou metod porovnejte.

Rozsah grafických prací: dle potřeby dokumentace

Rozsah průvodní zprávy: cca 40 stran

Seznam odborné literatury:

[1] J.Erhart: Piezoelektrické “chytré” materiály pro elektrotechniku, PZT keramika

Elektro 11 (2002) 4-7

[2] D. Malacara, Optical Shop Testing, John-Wiley & Sons, 1977, ISBN 0-471-52232-5

[3] N. T. Adelman, Y. Stavsky: Flexural/extensional behavior of composite piezoelectric circular plates, J. Acoust. Soc. Amer. 67, 3 (1980) 819-822

[2] M. Šulc, L. Burianová: Studium piezoelektrických dějů pomocí laserové interferometrie, Jemná mechanika a optika 10/01, 338-343

Vedoucí bakalářské práce: Doc. RNDr. Miroslav Šulc, PH.D,

Konzultant: Doc.Mgr.Jiří Erhart, Ph.D.

Zadání bakalářské práce: 27.10.2005

Termín odevzdání bakalářské práce: **19. 5. 2006**

L.S.

.....

Vedoucí katedry

.....

Děkan

V Liberci dne 27.10.2005

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 o právu autorském, zejména § 60 (školní dílo).

Beru na vědomí, že TUL má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé bakalářské práce a prohlašuji, že **s o u h l a s í m** s případným užitím mé bakalářské práce (prodej, zapůjčení apod.).

Jsem si vědom toho, že užít své bakalářské práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem TUL, která má právo ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů vynaložených univerzitou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše).

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Datum:

Podpis:

Poděkování

Chtěl bych poděkovat vedoucímu práce, Doc. RNDr. Miroslavu Šulcovi, Ph.D., za rady v oblasti laserové interferometrie. Dále panu Doc. Mgr. Jiřímu Erhartovi, Ph.D. za konzultace ohledně piezoelektrických materiálů. Mé díky patří i panu Lustigovi za ochotu při výrobě a úpravách mechanických součástí.

Abstrakt

Cílem bakalářské práce je studium piezoelektrických kruhových bimorfů. Měřené vzorky jsou vyrobeny z měkké PZT keramiky APC850. Disky sestávají ze dvou kruhových plátek o různých šířkách. Úvodní část zprávy se zabývá obecně piezoelektrickým jevem, materiály vykazující tento efekt. Speciálně se probírají vlastnosti polykystalické keramiky typu PZT. Při experimentu se měří prohnutí kruhových bimorfů skenováním povrchu pomocí Michelsonova a Mach-Zehnderova interferometru. Je také provedeno ilustrační měření pomocí Twyman-Greenova interferometru, který nefunguje na principu skenování, ale zobrazuje celý měřený povrch. V závěru se porovnávají naměřené hodnoty se spočtenými podle odvozeného vztahu pro statickou výchylku.

Klíčová slova: kruhový bimorf, laserová interferometrie, PZT keramika, piezoelektrika

Abstract

The aim of this bachelor thesis is study of piezoelectric circular bimorphs. The measured samples are made of soft piezoelectric PZT ceramics APC850. Discs are consisted of two circular plates with different thickness. There are information about piezoelectric effect and materials for these applications in the first part of thesis. The special chapter is engaged in polycrystalline PZT ceramics. There are used Michelson and Mach-Zehnder interferometers for measurement of very small displacements by surface scanning. The measurement by Twyman-Green interferometer is only informative. There are compared measured values and calculated ones at the end.

Keywords: circular bimorph, laser interferometry, PZT ceramics, piezoelectrics

Obsah

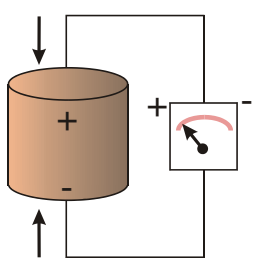
PROHLÁŠENÍ	4
PODĚKOVÁNÍ	5
ABSTRAKT	6
ABSTRACT	6
OBSAH	7
1. ÚVOD	8
1.1. PIEZOELEKTRICKÝ JEV	8
1.2. PIEZOELEKTRICKÉ MATERIÁLY	9
1.3. PZT KERAMIKA	10
1.4. POLARIZACE PZT KERAMIKY	11
2. PIEZOELEKTRICKÝ KERAMICKÝ KRUHOVÝ BIMORF	13
2.1. PIEZOELEKTRICKÝ BIMORF	13
2.2. STATICKÁ VÝCHYLKA KRUHOVÉHO BIMORFU	14
3. METODIKA MĚŘENÍ	16
3.1. INTERFERENCE	16
3.2. INTERFEROMETRY	18
3.2.1. Homodynové interferometry	18
3.2.2. Heterodynové detektory	19
3.2.3. Jednopaprskový Michelsonův interferometr	19
3.2.4. Dvoupaprskový Mach-Zehnderův interferometr	20
3.2.5. Twyman-Greenův interferometr	21
3.3. VÝROBA VZORKŮ	23
3.4. POSTUP MĚŘENÍ	24
3.4.1. Měření tloušťkové deformace	24
3.4.2. Měření posunutí	25
4. VÝSLEDKY MĚŘENÍ	28
4.1. TLOUŠŤKOVÁ ZMĚNA BIMORFU	28
4.2. PROHNUTÍ BIMORFU	29
4.2.1. Plošné měření Twyman-Greenovým interferometrem	29
4.2.2. Měření pomocí skenování povrchu	30
4.3. NAPĚŤOVÁ ZÁVISLOST PRŮHYBU BIMORFU	36
5. ZÁVĚR	40
POUŽITÁ LITERATURA	41
PŘÍLOHA	42

1. Úvod

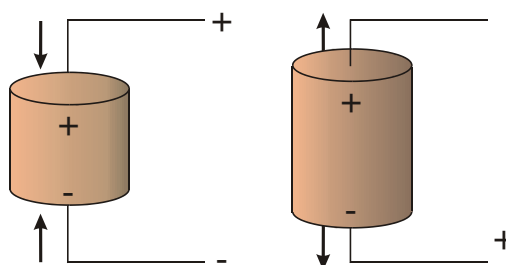
1.1. Piezoelektrický jev

V roce 1880 bratři Curierové pozorovali jako první projevy piezoelektřiny. Své pokusy prováděli na krystalech turmalínu a později křemene. Při působení určitou silou na tyto materiály se na plochách krystalu vznikl elektrický náboj. Velikost elektrického náboje byla přímo úměrná velikosti mechanického namáhání.

Na piezoelektrických materiálech můžeme pozorovat přímý a nepřímý piezo-elektrický jev. Při působení mechanických vlivů na materiál vzniká na povrchu elektrický náboj a tím elektrostatické pole. Tento jev nazýváme přímý (obr. 1.1). Polarita generovaného napětí závisí na tom, zda-li prvek natahujeme, či stlačujeme. Při stlačování je generováno napětí se stejnou polaritou, jakou mají elektrody na prvku. Při natahování je polarita opačná. Pokud vložíme materiál do elektrického pole, dojde k jeho deformaci, a tento jev označujeme jako nepřímý (obr. 1.2). Směr a velikost deformace závisí na intenzitě přiloženého elektrického pole. Prvek se smrští, pokud přiložené napětí má stejnou polaritu jako jeho elektrody. Roztáhne se při polaritě opačné.



Obr. 1.1
Přímý piezoelektrický jev



Obr. 1.2
Nepřímý piezoelektrický jev

Piezoelektrického jevu se dá použít v široké škále technických aplikací. Krystalu křemene se dá pro stálost svých kmitů použít v generátorech elektronických signálu s vysokým frekvenčním rozsahem. V optických zařízeních se používají pro nastavování velmi malých posuvů. V průmyslovém využití slouží například jako rozprašovače. V lékařském prostředí mohou generovat ultrazvukové vlny a pomáhat v diagnostických operacích. S využitím nepřímého jevu mohou sloužit jako tlaková nebo nárazová čidla.

1.2. Piezoelektrické materiály

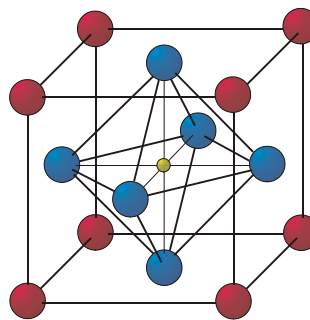
Piezoelektrické materiály mohou být monokrystalické a polykrystalické. Mezi monokrystalické patří zejména křemen. Používá se tam, kde jsou kladeny vysoké nároky na stálost materiálových parametrů. Velikost a tvar prvků z těchto látek je však limitována rozměry monokrystalu, ať už nalezeného v přírodě, nebo synteticky vytvořeného. Vlastnosti polykrystalických materiálů nejsou tak stálé. Oproti tomu jsou však velmi dobře modifikovatelné. U těchto prvků můžeme dosáhnout velikostí a tvarů, které by pomocí monokrystalů realizovat nešlo.

Velice dobře můžeme také ovlivňovat chemické složení materiálu pomocí různých příměsí. Modifikací chemického složení a technologie výroby můžeme velice dobře ve velkém rozsahu ovlivňovat fyzikální parametry materiálu. Jejich pořizovací náklady jsou výrazně nižší než při výrobě z monokrystalu. Jejich zpracování není tak náročné a odpadá zde vysoký, až 90% prořez.

Nutnou podmínkou pro vykazování jevu polykrystalickým materiálem je, aby látka byla také feroelektrikem. Ve feroelektrických látkách existují oblasti se spontánní polarizací. Tyto oblasti se nazývají domény. Směr polarizace je v každé doméně jiný. K tomu, aby se látka projevovala feroelektricky, je nutnou (ne však postačující) podmínkou, aby její struktura neměla střed symetrie. Těchto nesymetrických tříd existuje 21, ale jen 20 jich je piezoelektrických.

Pro piezoelektrické materiály je určitá kritická hodnota teploty, kterou nazýváme Curieho teplotou, kdy látka přechází z feroelektrického stavu do neferoelektrického a zpět. Tepelná energie je při této hodnotě teploty dostatečná k tomu, aby struktura udržela nevychýlený iont O^{2-} (obr. 1.3). Tato struktura má ideální perovskitový charakter. Je tedy kubická a má střed symetrie. Proto se krystal nechová jako elektrický dipól.

Pokud je teplota pod touto kritickou hodnotou, již nestačí energie udržet středový iont ve své ideální poloze a ten se vychýlí (obr. 1.4). Tím vznikne krystal s tetragonální

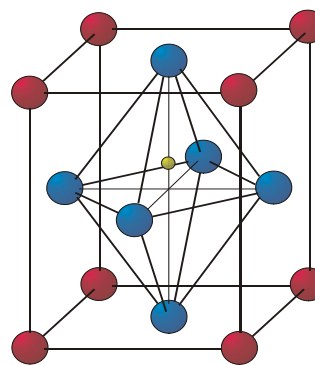


Obr. 1.3 – nad Curieho teplotou

- – A^{2+}
- – B^{2+}
- – O^{2-}

symetrií a zmizí střed symetrie. Takovýto krystal se pak projevuje jako elektrický dipól.

Všechny elementy, které se vychýlí stejným směrem utvoří domény. Tyto domény se také samy chovají jako dipóly. V objemu látky jsou však rozmístěny a orientovány náhodně a jejich výsledný náboj se tak vyruší a náboj tělesa je nulový. Pokud se materiál začne deformovat, budou sice vznikat na stěnách jednotlivých domén náboje, ale tyto se také vyruší. Z makroskopického hlediska tedy nelze pozorovat piezoelektrický jev.



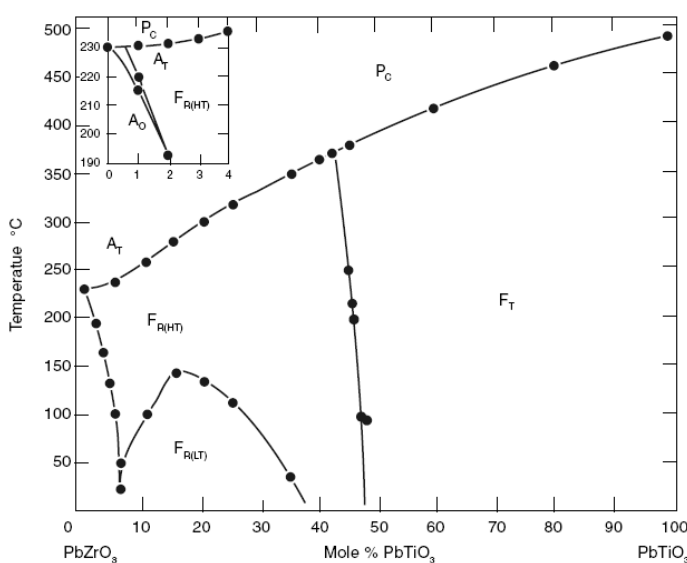
Obr. 1.4 – pod Curieho teplotou

- – A^{2+}
- – B^{4+}
- – O^{2-}

1.3. PZT keramika

Tyto keramiky jsou tuhými roztoky oxidů olova, zirkonu a titanu. Používají se dvě základní látky $PbZrO_3$ (PZ) a $PbTiO_3$ (PT). PZT keramika patří mezi nejvíce používanou feroelektrickou keramiku. Tyto keramiky mají velmi dobrou teplotní a časovou stabilitu svých parametrů.

Bylo zjištěno, že nejlepší vlastnosti má keramika, když je tvořena 48 % PZ. Při této koncentraci se na stavovém diagramu (obr. 1.5) nachází keramika



Obr. 1.5 – Stavový diagram PZT (převzato z...)

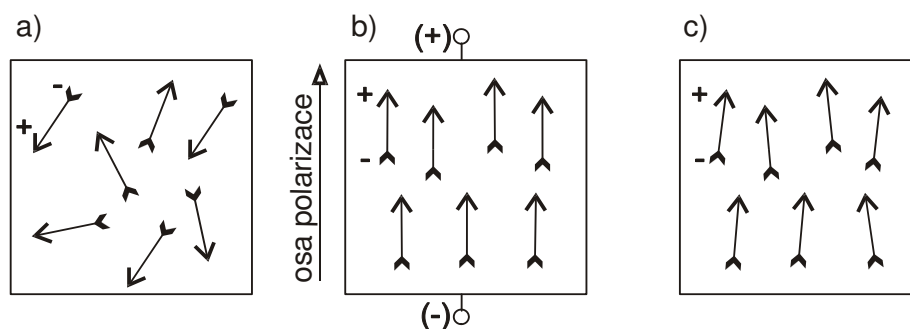
blízko MPB (morfotropní fázová hranice). Kolem této hranice nedochází k fázovým přechodům materiálu na velkém rozsahu teplot. Pokud by docházelo k přechodu mezi dvěma fázemi, změnila by se symetrie struktury látky a keramika by měnila své materiálové vlastnosti.

PZT keramika se vyrábí pomocí práškové metalurgie, proto se dá velice dobře ovlivňovat chemické složení výsledného materiálu. Vlastnosti se dají upravovat malým množstvím dopujících látek. Pokud se zlepší jedna vlastnost, je možné, že se další na úkor první zhorší. Některé vlastnosti se totiž navzájem vylučují.

1.4. Polarizace PZT keramiky

PZT keramika patří mezi polykrytalické piezoelektrické materiály. Zrna keramiky mají velikost v řádu mikrometrů. V keramice se vytvoří domény. Jednotlivá zrna se projevují piezoelektrickými vlastnostmi. Celkově se však PZT keramika piezoelektrickým efektem neprojevuje, neboť zrna jsou uspořádány náhodně a tím se efekt vynuluje. Aby se začala keramika chovat z makroskopického jako piezoelektrikum, musí být zpolarizována.

Polarizací se rozumí srovnání směrů spontánních polarizací jednotlivých zrn a to tak, aby měly co nejvíce podobné směry (viz obr. 1. 6). Polarizace se nejčastěji provádí přiložením elektrického pole na polarizovaný prvek. Po přiložení napětí se vyberou ty směry spontánních polarizací, které svírají s působícím polem nejmenší úhel. Při polarizaci dochází k mechanickým aktivitám mezi zrny. Pokud by bylo pole silné, mohlo by dojít k praskání keramiky. Při polarizaci PZT keramiky se užívá pole s intenzitou 2 až 4 kV/mm. Procesu polarizace se dá pomoci zvýšením teploty. Zvýšení teploty povolí vazby doménových stěn a tím se usnadní polarizace. Zvýšení teploty se může provádět například polarizací v přehřátém oleji. Podle pevnosti doménových stěn můžeme keramiky rozdělit na měkké a tvrdé. Měkké se mohou polarizovat nižším napětím.



Obr. 1.6 – Průběh polarizace

a) před polarizací; b) během polarizace; c) po polarizaci

Za určitých podmínek může dojít k částečné nebo úplné depolarizaci, čímž se výrazně změní piezoelektrické vlastnosti látky. Depolarizace je většinou stavem trvalým. Mezi jevy, které mohou depolarizaci vyvolat patří elektrické pole, teplota a mechanické namáhání. Další vliv na stálost polarizace může mít stárnutí keramiky.

Pokud pracuje element při vysoké teplotě, roste pohybová energie domén a ty se snaží přejít do jiné polohy. Tím mění směr své polarizace. Pokud teplota překročí Curieho hranici zaniknou jednotlivé dipóly. Při poklesu teploty se sice opět dipóly objeví, ale mají jinou orientaci a celkové piezoelektrické vlastnosti zanikají.

Depolarizační efekt se také může objevit při příliš vysokém přiloženém napětí. Jeho hodnota by neměla být vyšší než stovky voltů. Tato hranice je typická pro určité druhy materiálů.

2. Piezoelektrický keramický kruhový bimorf

Piezoelektrické kompozitní prvky slouží především k převodu elektrického napětí na sílu, tlak nebo moment a opačně. Tyto prvky mají většinou větší reakce na buzení než jednoduché prvky. Jsou tři základní skupiny – unimorfy, bimorfy a polymorfy.

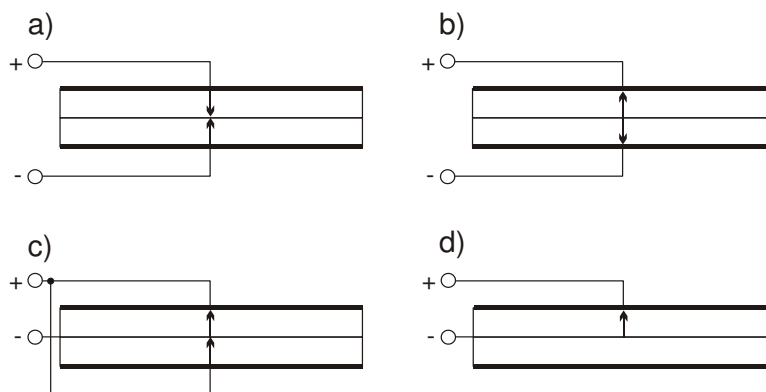
Unimorfy jsou tvořeny většinou kovovou destičkou, na kterou je nalepen piezoelektrický prvek, například PZT keramika. Většinou jsou tato uskupení kruhová a používají se na generátory akustických signálů.

Bimorfy jsou prvky ze dvou piezoelektrických destiček, tyčinek, disků. Používají se především jako aktuátory pro převod elektrického budícího napětí na posunutí, které je vyvoláno průhybem.

Polymorfy mají více než dvě vrstvy PZT keramiky. Slouží také k převodu napětí na průhyb, ale mají mnohem vyšší účinnost. Jejich reakce je výrazně vyšší při stejném budícím napětí.

2.1. Piezoelektrický bimorf

Bimorf je plátek, disk, tyčinka skládající se z několika vrstev piezoelektrického materiálu. Popřípadě se mohou kombinovat ještě s jinými materiály, jako je plech. Podle přiloženého napětí a vzájemných polarizací vrstev bimorfu rozdělujeme na sériové (antiparalelní), paralelní bimorfy a unimorfy. Paralelní bimorfy mají dvojnásobné prohnutí oproti sériovým, neboť je zde vytvářeno dvojnásobné elektrické pole.

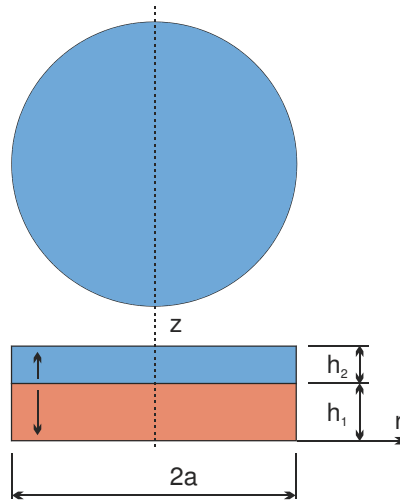


Obr. 2.1 – Seskupení bimorfů
a), b) sériové; c) paralelní; d) unimorf

Deformace bimorfu jsou úměrné velikosti působícího napětí. Pokud je elektrické pole paralelní s polarizací, prvek se smršťuje v rovinách kolmých na pole a roztahuje se ve směru pole. Pokud se spojí dva piezoelektrické prvky tak, že nedochází k podélným deformacím. Jeden prvek se začne smršťovat a druhý roztahovat, čímž dojde k prohnutí bimorfu.

2.2. Statická výchylka kruhového bimorfu

Po přiložení napětí U na bimorf s tloušťkami vrstev h_1 a h_2 , poloměrem a , vznikne průhyb tohoto prvku.



Obr. 2.2 – Geometrie kruhového bimorfu

Podle vzorce (17) z článku [4] je

$$u_{z0} = \frac{U \cdot E_2 \cdot (r^2 - a^2)}{2 \cdot h \cdot (D_{11} + D_{12})} \quad (1)$$

přičemž

$$E_2 = \int_0^h z \cdot \bar{e}_{31} dz, \quad D_{11} = \int_0^h z^2 \cdot \bar{c}_{11} dz, \quad D_{12} = \int_0^h z^2 \cdot \bar{c}_{12} dz$$

$$h = h_1 + h_2, \quad \bar{e}_{31} = e_{31} - e_{33} \cdot \frac{c_{11}}{c_{33}}, \quad \bar{c}_{11} = c_{11} - \frac{c_{13}^2}{c_{33}}, \quad \bar{c}_{12} = c_{12} - \frac{c_{13}^2}{c_{33}}, \quad d_{31} = \frac{\bar{e}_{31}}{\bar{c}_{11} + \bar{c}_{12}}$$

Materiálové vlastnosti jsou pro obě části absolutní hodnotě stejné. Liší se jen znaménkem pro koeficient \bar{e}_{31} . Pro horní disk je kladný, pro dolní záporný.

Po integraci získáme

$$E_2 = \int_0^h z \cdot \bar{e}_{31} dz = \int_0^{h_1} z \cdot (-\bar{e}_{31}) dz + \int_{h_1}^h z \cdot \bar{e}_{31} dz = \bar{e}_{31} \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot h^2 - h_1^2 \right) =$$

$$= \frac{1}{4} \cdot \bar{e}_{31} \cdot h^2 \cdot \left[2 - \left(\frac{2 \cdot h_1}{h} \right)^2 \right]$$

$$D_{11} = \bar{c}_{11} \cdot \frac{h^3}{3}, \quad D_{12} = \bar{c}_{12} \cdot \frac{h^3}{3}$$

Výchylku na povrchu bimorfu získáme dosazením do vztahu (1).

$$u_{z0} = \frac{3 \cdot U \cdot \bar{e}_{31} \cdot (r^2 - a^2)}{8 \cdot h^2 \cdot (\bar{c}_{11} + \bar{c}_{12})} = \frac{3 \cdot U \cdot d_{31}}{8 \cdot h^2} \cdot \left[2 - \left(\frac{2 \cdot h_1}{h} \right)^2 \right] \cdot (r^2 - a^2)$$

Závislost průhybu na vzdálenosti od středu je tedy kvadratická.

Materiálový koeficient pro použitou keramiku je podle údajů výrobce [5]

$$d_{31} = -175 \text{ pC/V}$$

3. Metodika měření

Průhyby kruhových bimorfů by se měly pohybovat v řádech nanometrů až mikrometrů. Malá posunutí dají například měřit pomocí kapacitního snímače polohy. Tato vak mají rozlišení přibližně mikrometry, což není příliš dostačující. Vysoké přesnosti je možno dosáhnout metodou laserové interferometrie. Různé modifikace interferometrů mají rozlišení až v řádech pikometrů.

3.1. Interference

Světelnou vlnu lze popsat vektorem intenzity elektrického pole v závislosti na čase a polohy v prostoru. Pokud je tato vlna rovinná monochromatická je její vlnová rovnice zapsána ve tvaru

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \vec{E}_0(\vec{r}, t) \cdot e^{i(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r})},$$

kde ω je úhlová frekvence vlny a \vec{k} je vlnové číslo.

Pokud jsou v prostoru současně dvě nebo více vln, je výsledná vlnová rovnice součtem dílčích vlnových funkcí. Když dojde k interferenci může být výsledná intenzita větší, nebo menší než součet intenzit sčítaných vln. Amplituda vzniklé vlny je dána součtem všech intenzit v daném místě i času. Intenzita v důsledku interferencí nemusí být dána součtem intenzit jednotlivých signálů. Pro intenzitu složenou z více vln platí

$$I(\vec{r}, t) = |\vec{E}(\vec{r}, t)|^2$$

Pro skládání dvou vln je vztah pro intenzitu pole

$$I(\vec{r}, t) = I_1 + I_2 + 2 \cdot E_{01} \cdot E_{02} \cdot \cos[(\omega_1 - \omega_2) \cdot t - (\varphi_1 - \varphi_2)]$$

První dva členy jsou intenzitami skládajících se signálů. Interferenci popisuje třetí člen vztahu a z něj jsou patrná některá fakta o interferenci. Pokud jsou vlny navzájem polarizované kolmo, nedochází k interferencím, neboť skalární součin se rovná nule. Pokud jsou frekvence těchto vln různé, bude intenzita výsledné vlny modulována rozdílem frekvencí a bude se tedy měnit v čase. Fázový posuv vln může být různý, ale musí se měnit pouze s polohou, nesmí být proměnlivý v čase.

Interference je pozorovatelná ve formě interferenčních obrazců (proužky, nebo jiné tvary). K tomu, aby byly interference pozorovatelné, musí se vlny spojit v místě, kde kmitají se stejnou frekvencí a mají časově nezávislý fázový posuv. Vlny, které toto splňují, se nazývají koherentní.

Dvě koherentní vlny je možné získat použitím jednoho zdroje paprsku. K tomu se nejčastěji používá laser. Laser je optický oscilátor. K zesílení paprsku se dosahuje stimulovanou emisí v atomárních nebo molekulových systémech při přechodu mezi hladinami s inverzním obsazením. Laser je tedy zdrojem koherentního monochromatického světla, které je lineárně polarizované. Paprsek má nerozšířavý průřez a jeho intenzita je vysoká a její ztráty jsou minimální. Paprsek lze libovolně směřovat a upravovat. Většinou má paprsek průřez ve tvaru gaussovského svazku, což znamená, že jeho intenzita je nejvyšší ve středu a směrem k okrajům klesá.

Důležitým parametrem světelného paprsku je jeho polarizace. Polarizace je určena směrem vektoru intenzity elektrického pole $\vec{E}(\vec{r}, t)$ a jeho závislostí na čase. Pro monochromatické světlo se všechny parametry vektoru mění harmonicky s časem. Jejich amplitudy a fáze jsou různé, takže pro danou hodnotu souřadnice, v jejímž směru se vektor pohybuje, rotuje koncový bod periodicky v rovině a opisuje elipsu. Polarizace vlny je tedy určena tvarem této elipsy, amplitudou a fází jednotlivých složek. Pokud jedna složka elipsy vymizí, nebo fázový posuv mezi složkami je rovný nule, je světlo polarizováno lineárně. Na polarizaci závisí vlastnosti světla. Určuje, jak se bude paprsek chovat na rozhraní dvou látek. Jak se bude odrážet, jak bude absorbován nebo jak bude procházet látkou. Z nepolarizovaného světla můžeme získat lineárně polarizované například polarizátorem. Pomocí různých optických prvků můžeme získávat různé polarizace.

Aby byl rozdíl mezi maximální a minimální hodnotou intenzity světla, musí být interferující vlny polarizované ve stejném směru. Pokud mají stejné polarizace, můžeme vztah pro intenzitu zjednodušit

$$I(\vec{r}, t) = I_1 + I_2 + 2 \cdot \sqrt{I_1 \cdot I_2} \cdot \cos \Delta \varphi$$

Třetí člen popisující interferenci nabývá kladných a záporných hodnot a tím určuje, je-li interference konstruktivní (světlo má velkou intenzitu), nebo

destruktivní (světlo má minimální intenzitu). Vlivem tohoto periodického kolísání intenzity vznikají pozorovatelné interferenční obrazce. Pokud spolu interferují dva paprsky, jejichž polarizace svírají malý úhel, dojde ke změně vzdálenosti interferenčních proužků.

3.2. Interferometry

Interferometr je optický přístroj pro měření velmi malých změn vzdálenosti, pro určování indexu lomu. Funguje na principu štěpení svazku na dva paprsky, které urazí různé vzdálenosti. Soustavou zrcadel a děličů dojde opět ke spojení paprsků a pak se měří intenzita vzniklého signálu. Interferometry mohou být v uspořádání jako jeden celek (interferometrický mikroskop), nebo jako modulární sestava z jednotlivých stavebních prvků. Metody můžeme rozdělit do dvou skupin. Jedna využívá homodynové detektory, druhá heterodynové. Tvar interferenčních obrazců je závislý na konfiguraci soustavy a také na zdroji paprsku. Závisí také na kvalitě a prohnutí ploch.

3.2.1. Homodynové interferometry

Existují dva druhy interferometrů – jednopaprskové (Michelsonův) a dvoupaprskové (Mach–Zehnderův). K interferenci dochází mezi dvě paprsky se stejnou frekvencí. Paprsek se na vstupu interferometru rozdělí do dvou větví. Z jedné větve jde paprsek na referenční zrcátko. Ve druhé dopadá paprsek na vzorek, od kterého se odráží. V místě, kde se tyto dva paprsky opět spojí, platí vztah pro intenzitu

$$I = I_p + I_r + 2 \cdot \sqrt{I_p \cdot I_r} \cdot \cos(4 \cdot \pi \cdot \Delta d / \lambda),$$

kde I_p je intenzita paprsku dopadajícího na vzorek, I_r je intenzita světla referenční větve, Δd je posunutí vzorku a $2\Delta d$ je rozdíl optických drah, vyvolaný prohnutím vzorku. Pokud uvažujeme intenzity maxim I_{max} a minim I_{min} interferenčních proužků, můžeme rovnici přepsat

$$I = \frac{I_{max} + I_{min}}{2} + \frac{I_{max} - I_{min}}{2} \cdot \cos(4 \cdot \pi \cdot \Delta d / \lambda) \quad (2)$$

Počáteční fázový rozdíl nastavíme na $\pi/2$. Tím se dostaneme do oblasti, kde je změna intenzity v závislosti na dráze paprsků největší. V tomto místě se také v rovnici (2) objeví místo funkce kosinus sinus. Protože je v této oblasti

průběh téměř lineární, můžeme funkci lineárně aproximovat a uvažovat $\sin x = x$. Tímto se nám vztah (2) upraví na

$$I = \frac{I_{\max} + I_{\min}}{2} + \frac{I_{\max} - I_{\min}}{2} \cdot 4 \cdot \pi \cdot \Delta d / \lambda$$

Pokud na piezoelektrický prvek přiložíme napětí s harmonickým průběhem, i odezva na buzení bude mít harmonický průběh a $\Delta d = \cos(\omega t)$. Na fotodiodě, nebo jiném detektoru, můžeme pozorovat střídavé napětí, pro které platí

$$U(t) = U_r + U_{pp} \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot d_0}{\lambda} \cdot \cos(\omega t),$$

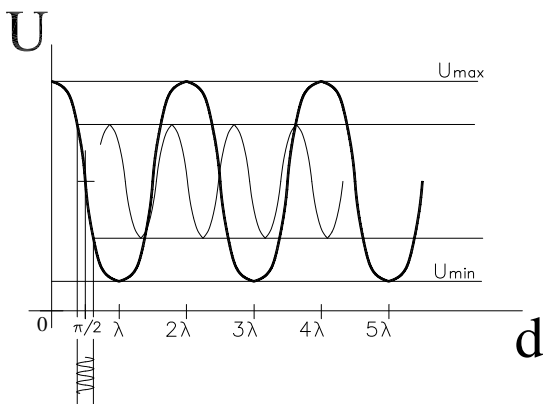
kde $U_r = (U_{\max} + U_{\min}) / 2$ a tato hodnota odpovídá nastavenému $\pi/2$ bodu, U_{pp} je napětí mezi špičkami signálu na fotodetektoru a odpovídá maximální změně intenzity interferenčního signálu.

3.2.2. Heterodynové detektory

V uspořádání Michelsonova interferometru využívají v referenční větvi Braggovu celu, která je tvořena nelineárním krystalem. Laserový paprsek po průchodu celou změní svou frekvenci o frekvenci cely. Interferenční obrazec je tvořen paprsky od vzorku a od referenčního zrcátka. Složením dvou vlnění vznikne signál s frekvencí cely. Posunutí vzorku způsobí fázový posuv mezi signálem na fotodetektoru a budícím signálem cely. Z tohoto fázového rozdílu je možné určit velikost posunutí piezoelektrického prvku.

3.2.3. Jednopaprskový Michelsonův interferometr

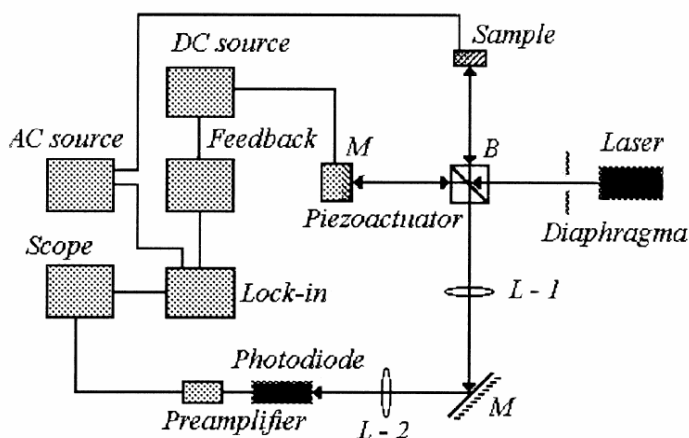
Toto zapojení (obr. 3.2) je velice jednoduché. Laserový paprsek se pomocí



Obr. 3.1 – Nastavení $\pi/2$ bodu

nepolarizovaného děliče rozdělí na dva svazky. Tyto větve musí být na sebe navzájem kolmé. V jedné větvi je umístěn měřený vzorek, ve druhé pak zrcátko nalepené na piezoelektrický aktuátor. Pomocí aktuátoru můžeme nastavovat vzájemný fázový posuv $\pi/2$ (obr. 3.1). V tomto sestavení nelze odlišit

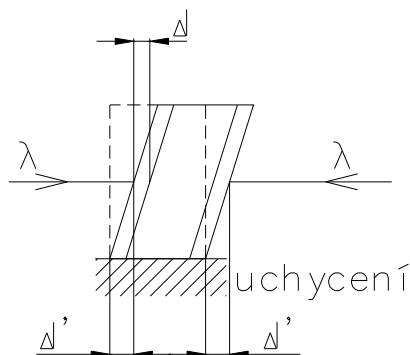
posunutí vyvolané piezoelektrickým jevem od posunutí vzniklého deformací, upnutím, vychýlením, nebo prohnutím. Tyto jevy mohou být u slabších prvků větší než samotné měřené posunutí, a proto se tento interferometr hodí pro měření silnějších vzorků, kde jsou tyto nežádoucí jevy zanedbatelné.



Obr. 3.2 – Sestava Michelsonova interferometru

3.2.4. Dvoupaprskový Mach-Zehnderův interferometr

Tento interferometr řeší problém s vlastním posunutím vzorku. Zde je

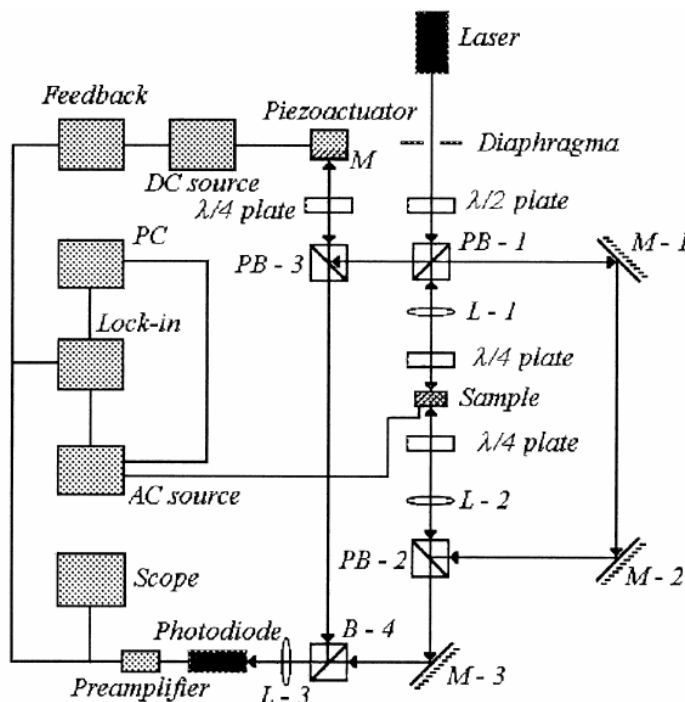


Obr. 3.3 – Eliminace nežádoucích posunutí více paprsky

paprsek z laseru rozdělen pomocí polarizovaného děliče do dvou větví. Paprsek ve větvi vzorku se od odrazivé vrstvy vede přes optickou soustavu na druhou stranu měřeného prvku. Zkrácení (resp. prodloužení) dráhy paprsku dopadajícího na čelní plochu je kompenzováno prodloužením (resp. zkrácením) dráhy na zadní straně, neboť obě změny posunutí jsou stejně dlouhé (obr. 3.3). Interferometr tedy měří pouze tloušťkovou změnu piezoelektrického prvku.

I v tomto zapojení (obr. 3.4) je ve větvi referenčního paprsku umístěn aktuátor s nalepeným zrcátkem. Zde také slouží k nastavení pracovního $\pi/2$ bodu. Půlvinová destička před vstupním polarizačním děličem otáčí rovinu polarizace světla. Zde slouží k nastavování intenzity světla v jednotlivých

větvích. Natočením půlvlnové destičky upravíme poměr intenzity v obou větvích na 50:50, což zaručí maximální kontrast interferenčního obrazce.



Obr. 3.4 Sestava Mach-Zehnderova interferometru

Pro realizaci tohoto dvouvětového zapojení je potřeba mnoho optických prvků. Použity jsou 4 děliče, 3 zrcátka, 1 aktuátor se zrcátkem a 3 čtvrtvlnové destičky. S rostoucím počtem použitých součástí se zvyšuje náchylnost rušivé prvky v okolí. Dochází k nárůstu šumu. Všechny prvky by měly být opatřeny antireflexivními vrstvami, aby nedocházelo ke zbytečným ztrátám intenzity, z důvodu rozptylů. Všechny šумы a vlivy na použití prvky zkreslují vlastní měření.

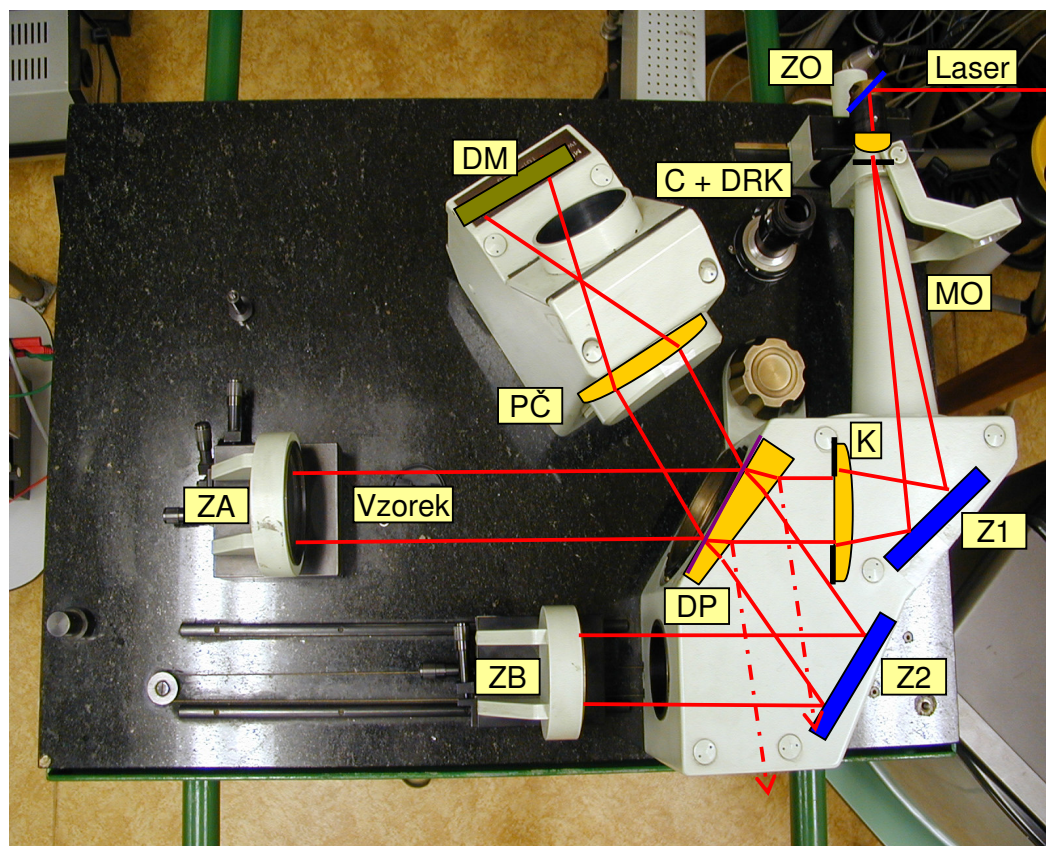
Tento interferometr je vhodný pro měření tenkých vzorků jako jsou fólie, nebo napařené tenké vrstvy.

3.2.5. Twyman-Greenův interferometr

Twyman-Greenův interferometr je obdobou Michelsonova interferometru. Je zde však použit širší paprsek. Obraz, který dostáváme na výstupu z interferometru znázorňuje jednotlivé vrstevnice na vzorku.

Konfigurace je zobrazena na obrázku 3.5. Paprsek z laseru je nasměrován na objektiv mikroskopu se zvětšení 10x a ten fokusuje světlo na vstupní

kruhovou clonu, která je umístěna na otočném kotoučku. Clona nám umožňuje volit průměr paprsku. Před clonkou je rotující kotouč z difúzního materiálu, který slouží k homogenizaci vlnoploch světla. Rozbíhající se paprsek je zrcátkem Z1 směřován na kolimátor. Z něj pak vychází rovnoběžný paprsek ohraničený clonou a dopadá na dělič. Dělič má klínový tvar, aby nežádoucí odrazy dopadaly mimo měřicí soustavu. První část paprsku projde děličem na vzorek s odrazivou vrstvou a vrací se zpět na reflexivní vrstvu děliče. Tato větev je měřicí. Druhá část světla je odrážena na zrcátko Z2, které vede paprsek na referenční zrcadlo. Paprsek z referenční větve se pak vrací na dělič, kde se spojuje s paprskem měřícím. Interferující paprsky jsou potom přiváděny na difúzní matici, nebo pomocí objektivu na čip snímací kamery. Nasnímané obrazy je pak možno pomocí počítače analyzovat a změřit prohnutí vzoru.



Obr. 3.5 – Twyman-Greenův interferometr

ZO – zrcátko objektivu; C + DRK – clona a difúzní rotující kotouč;

MO – mikroskopický objektiv; Z1, Z2 – zrcadla; K – kolimátor se clonou;

DP – dělič paprsku; ZA, ZB – zrcadla interferometru; PČ – projekční čočka;

DM – difúzní matice

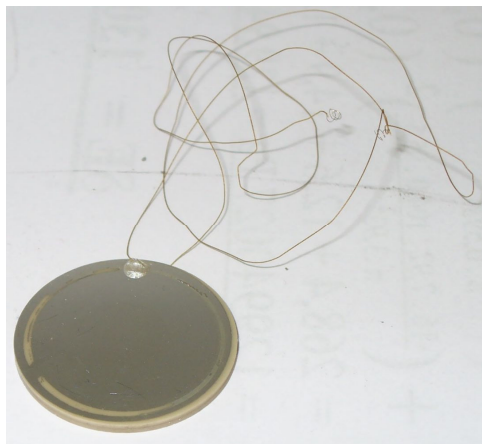
3.3. Výroba vzorků

Vzorky jsou slepeny ze dvou kruhových plátek různých šířek pomocí akrylátového lepidla. Ty se vyrábějí jako 1,25 mm tlusté lupínky. Na potřebnou tloušťku se musí zbrousit. Byly vyrobeny plátky o tloušťkách od 0,25 mm do 1,2 mm a o průměru 25 mm. Na jedné straně je již od výrobce elektroda. Na druhou stranu se nanese elektroda druhá. Takto upravený prvek se zpolarizuje. Provedlo se měření frekvenční charakteristiky pro nalezení rezonanční frekvence radiálních kmitů. Podle této hodnoty se vytvořily dvojice, které mají co nejvíce podobné rezonanční frekvence. To zaručí, že vrstvy bimorfu mají podobné materiálové vlastnosti. Po měření frekvenčního spektra se nanesená elektrody odstranily.

Použilo se sériového spojení plátek, aby nenastaly problémy s připojením prostřední elektrody. Jeden plátek bimorfu měl u všech vzorků stejnou tloušťku 0,4 mm. Vzhledem k rozměrům vzorku se nemusí brát příliš ohled na velikost prohnutí, to je u sériového spojení menší, neboť toto by mělo být dostatečně velké.

Abychom mohli použít metodu interferometrie, je nutné, aby povrch bimorfu byl velmi dobrým odražečem. Nejlepší variantou je napaření slabé vrstvičky reflexního materiálu (hliník, stříbro). Nevhodné by bylo nalepení zrcátka, neboť by mohlo ovlivňovat roztahování (resp. smršťování). Povrch PZT keramiky však nebylo dostatečně hladký. Muselo se tedy povrch velice precizně přeštit, aby povrch ztratil svůj

difúzní charakter. Po těchto úpravách je na stěnách bimorfu velice kvalitní zrcátko. Protože reflexní vrstva je z vodivého materiálu, můžeme ji považovat za elektrodu. Na kraje zrcátek jsme přilepili stříbrnou pastou tenké vodiče se smaltovou povrchovou úpravou, která zabraňuje vzniku zkratu.



Obr. 3.6 – Vzorek s nalepenými kontakty

Po všech výrobních krocích se vybraly 3 vzorky, které se použily pro měření. Pro měření je nutné, aby byly u vzorku splněny okrajové podmínky. Byl tedy navržen speciální držák, který svíral vzorek po obvodu pomocí O-kroužků s průměrem 22 mm.

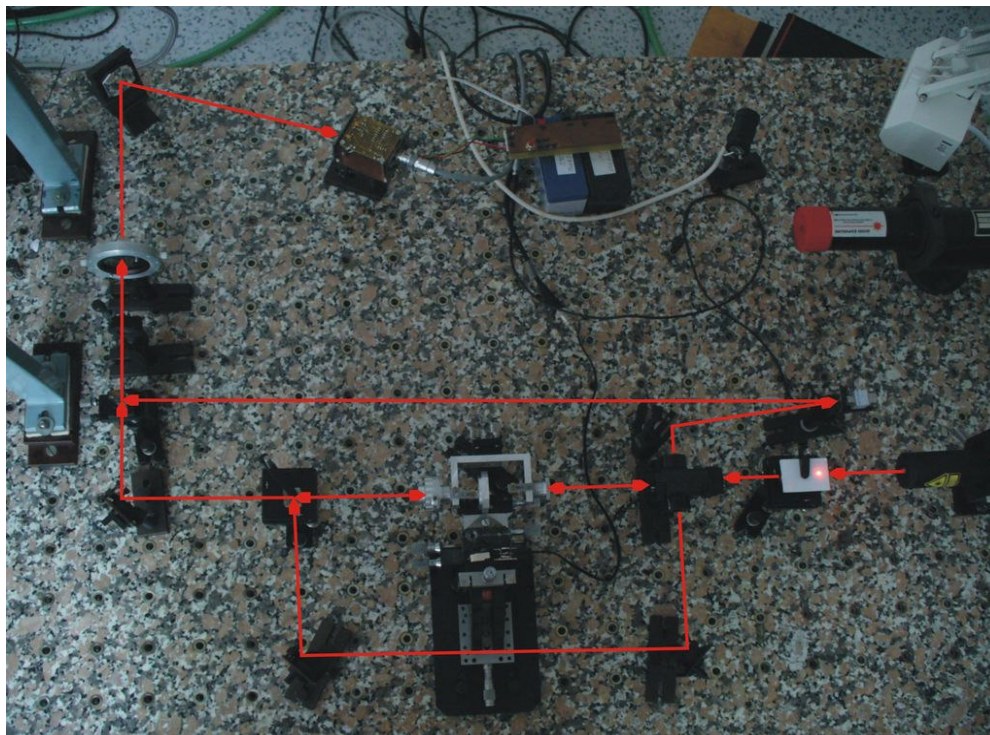
3.4. Postup měření

Nejprve se měřila tloušťková změna vzorku při přiložení napětí, aby se potvrdilo, že tato změna je u těchto rozměrů zanedbatelná a nebude tedy ovlivňovat samotné měření výchyly. Pak se přistoupilo k měření výchyly bimorfu pomocí skenování povrchu. Dále se také provedlo měření napěťové závislosti prohnutí ve středu disku.

Prakticky veškeré měření bylo prováděno automaticky pomocí přístrojových funkcí, proto se dá říci, že chyba naměřených hodnot je rovna obecné přístrojové chybě 5 %.

3.4.1. Měření tloušťkové deformace

K tomuto účelu jsme použili modifikovaný Mach-Zehnderův interferometr (obr 3.7).



Obr. 3.7 – Sestava dvoupraskového Mach-Zehnderova interferometru

Piezelektrický aktuátor je připojen na vysokonapěťový zdroj stejnosměrného signálu. Ten umožňuje nastavit polohu přilepeného zrcátka s velmi vysokou přesností. Na vstup zdroje se přivedl sinusový signál. Podle rozkmitu na výstupu fotodiody se zjistí hodnota napětí pro pracovní $\pi/2$ bod. Po odpojení signálu se nastaví offsetem aktuátor do takové polohy, aby intenzita na fotodetektoru byla právě v pracovním bodě.

Signálem z funkčního generátoru HP33120A se budí vzorek, který se začne prohýbat. Signál z fotodiody je přiveden do fázově zavěšeného zesilovače (lock-in), který dokáže zesilovat signály s definovanou frekvencí. Ostatní frekvence potlačí, tudíž omezuje vliv rušivých signálů. Dokáže také vyselektovat signál, který je až 1000krát slabší než okolní šum. Frekvence námi požadovaného signálu je definována synchronizačním signálem generátoru. Výstup lock-inu je přiveden na zápornou zpětnou vazbu, která udržuje pomocí aktuátoru pracovní bod na námi zvolené hodnotě.

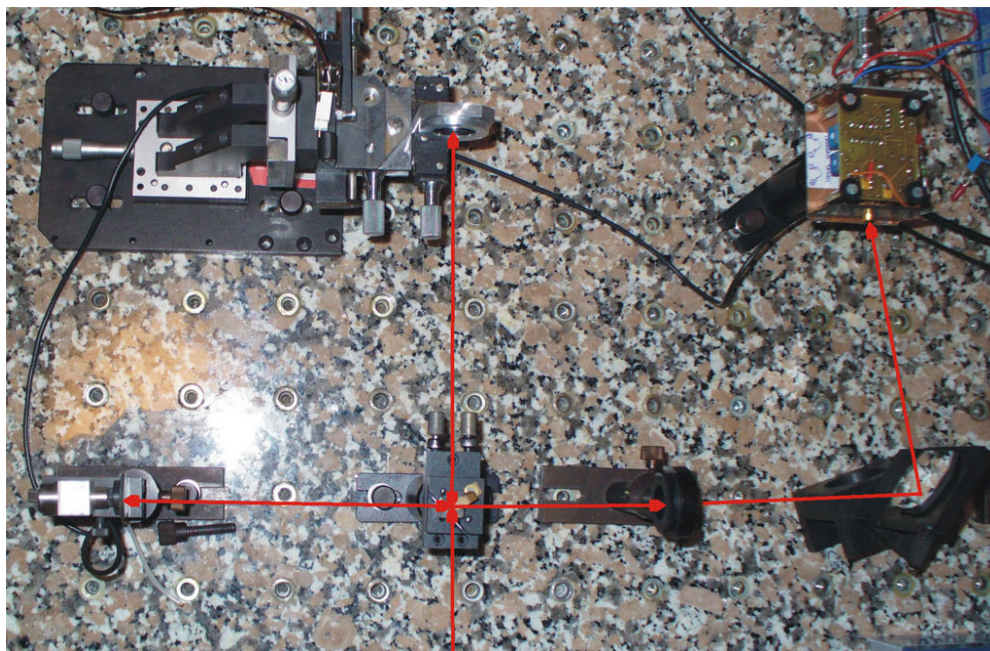
Napětí zjištěné zesilovačem je načítáno do počítače, který díky programu a komunikaci s jednotlivými elektronickými prvky řídí celý proces měření. Program z načtených hodnot vypočítává hodnotu $d0$ dle vztahu

$$d0 = \frac{U_{OUT}}{U_{PP}} \cdot \frac{\lambda}{\sqrt{2} \cdot \pi}$$

3.4.2. Měření posunutí

Při měření této veličiny se experimentovalo s dvěma modifikacemi Michelsonova interferometru. První z nich je standardní konfigurace (obr. 3.8).

Vzorek je buzen trojúhelníkovým signálem o velmi nízké frekvenci 1 Hz a dostatečně velkou amplitudou signálu, aby zaručeně i v krajnějších polohách došlo k měřenému posunutí. Michelsonův interferometr v tomto uspořádání má problém s měřením délek menších než čtvrtina vlnové délky použitého světelného signálu. Protože je vzorek buzen pomaloběžným signálem, lze tedy považovat měření téměř za statické (resp. kvazistatické).



Obr. 3.8 - Sestava jednopaprskového Michelsonova interferometru

Signál z fotodiody byl přiveden na digitální osciloskop, který je přes sériový port připojen k počítači. Z průběhu se zjistila doba Δt mezi maximem a sousedícím minimem. Se znalostí vstupních konstant můžeme uvažovat vztah pro statickou výchylku

$$d_0 = \frac{T_B / 2}{\Delta t} \cdot \frac{\lambda}{2} \cdot \frac{1}{2},$$

kde T_B je perioda budícího trojúhelníku, ze které se uvažuje pouze jedna polovina (prohýbání jedním nebo druhým směrem). Přechod z maxima do minima odpovídá posuvu o polovinu vlnové délky.

Povrch byl skenován přes střed nejprve horizontálním a pak vertikálním směrem. Skenování do kříže je možné díky předpokládané symetrii průhybu vzorku.

Druhou možností, jak měřit posunutí, je takzvané měření v kvadratuře. Na vstupu se paprsek rozdělí polarizovaným děličem a paprsky v jednotlivých větvích mají ortogonální polarizace. Čtvrtvlnové destičky jsou natočeny o $\pi/4$ oproti polarizaci paprsků a změni jeho polarizaci na kruhovou. Po odrazu od zrcátka dojde ke změně fáze a po opětovném průchodu destičkami dojde ke změně polarizace na $\pi/2$ oproti původní. Tyto paprsky se spojí a jdou přes další

čtvrtvlnovou destičku na depolarizační dělič. Ten paprsky rozdělí. Před detektory jsou navzájem dokonale zkřížené polarizátory natočené o $\pi/4$ oproti kolmému směru. Tím je průběh napětí na jednom detektoru za druhým zpožděn o $\pi/2$.

Pokud se osciloskop zobrazující signály z obou fotodiod přepne do režimu X-Y a seřídíme-li amplitudy signálů tak, aby byly stejné, můžeme pozorovat pohyb výchylky po kružnici. Fázový posuv mezi těmito signály můžeme spočítat ze vztahu

$$\tan \varphi(t) = \frac{U_Y(t)}{U_X(t)}$$

Pro hodnotu posunutí d_0 potom platí vzorec

$$\Delta d(t) = \frac{\tan \varphi(t)}{4 \cdot \pi} \cdot \lambda$$

U této metody se však projevila vysoká náchylnost na okolní vzruchy a bod na osciloskopu nebyl na jenom místě. Nedalo se tedy dostatečně přesně odečítat hodnoty na jednotlivých osách.

4. Výsledky měření

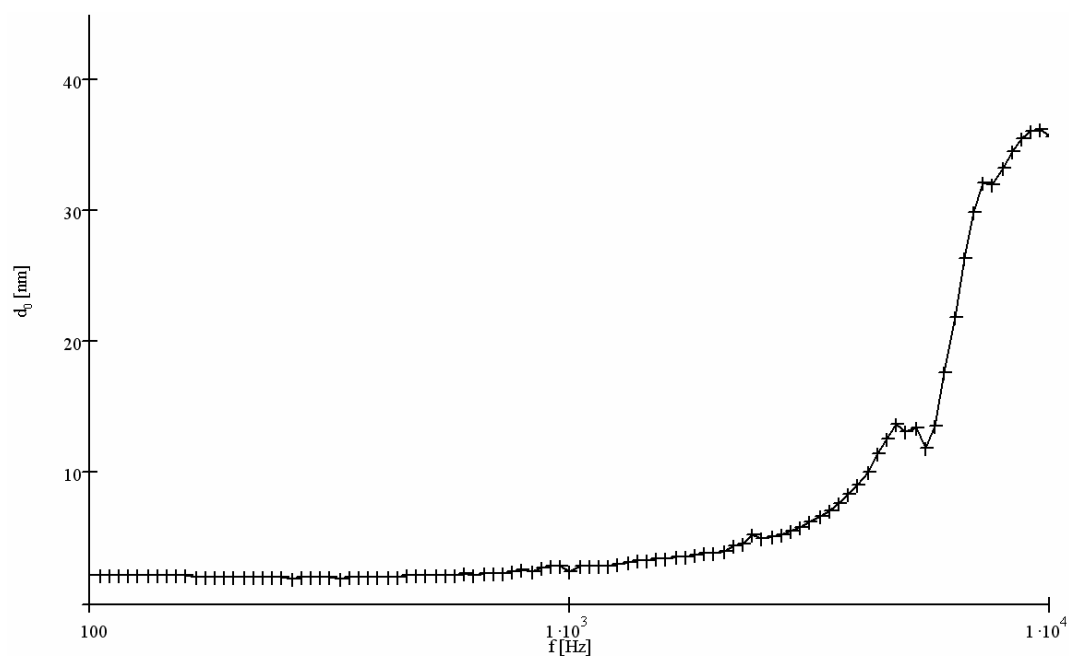
Byly měřeny tři různé vzorky, u kterých se měnila tloušťka druhého plátku (viz tabulka 4.1). Tloušťka prvního plátku byla u všech vzorků shodná. Vzorky byly polarizovány v olejové lázni ještě před slepením přiloženým elektrickým polem 2 kV/mm po dobu 10 minut.

Číslo vzorku	Tloušťka 1. plátku (h_1)	Tloušťka 2. plátku (h_2)
1	0,4 mm	1,18 mm
2	0,4 mm	0,50 mm
3	0,4 mm	0,98 mm

Tabulka 4.1 – Tloušťky plátků tvořících bimorfy

4.1. Tloušťková změna bimorfu

Vzorek byl buzen signálem s amplitudou 5 V a s frekvenčním rozsahem 100 Hz až 10 kHz. Z grafu 4.1 je patrná linearita tloušťkové deformace na frekvencích nižších než 1 kHz. V okolí frekvence 10 kHz se projevilo několikanásobně větší prohnutí. Toto je způsobeno buzením frekvencí, která odpovídá frekvenci vlastních kmitů bimorfu.



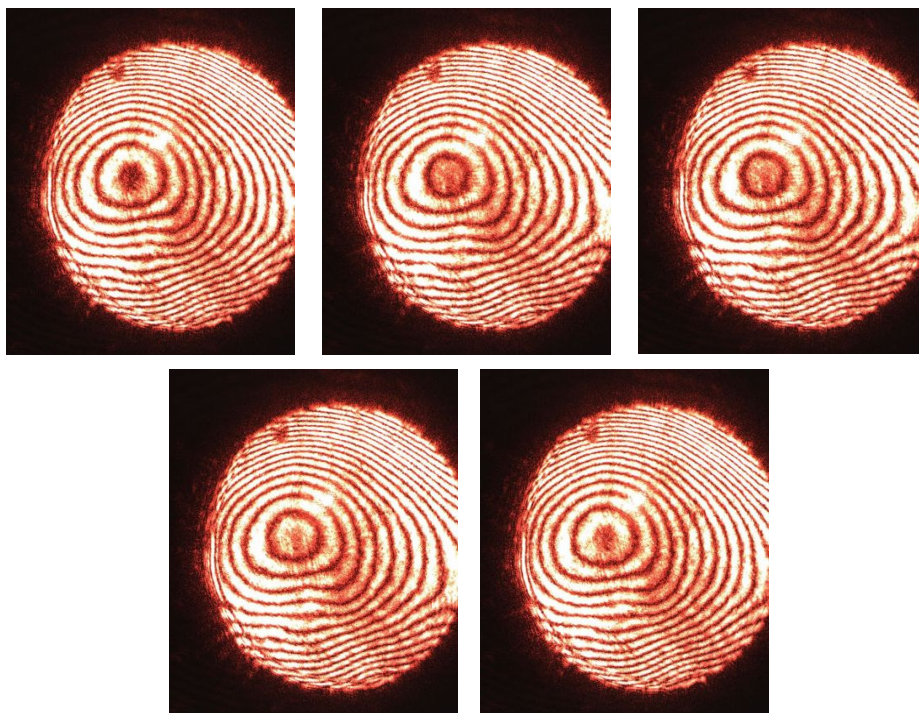
Graf 4.1 – Posunutí vzorku 1 v závislosti na frekvenci

Měřené bimorfy jsou heterogenní, což má za následek nenulovost tloušťkové změny jako u vzorků se stejně tlustými plátky. V lineární oblasti je prohnutí v řádech nanometrů a nemůže tedy ovlivnit samotné měření posunutí, neboť předpokládané hodnoty posunutí jsou o dva až tři řády vyšší. Pro další dva vzorky byly průběhy velmi podobné a změny tloušťky nabývaly bezpečně malých hodnot.

4.2. Prohnutí bimorfu

4.2.1. Plošné měření Twyman-Greenovým interferometrem

Pro toto měření byl vybrán vzorek s nejmenší tloušťkou, neboť u něj lze předpokládat největší hodnoty prohnutí. Vzorek byl připojen na zdroj stejnosměrného napětí, které bylo zvyšováno od 0 do 20 V. Interferenční obrazec byl přiveden pomocí objektivu na CCD čip kamery a pomocí počítače se snímaly postupně obrazy. Zjištění prohnutí v daných místech by bylo možné pomocí počítače a obrazové analýzy nasnímaných materiálů.



Obr. 4.1 – Postup interferenčních proužků se změnou napětí

Na obrázku 4.1 je zachycena odezva vzorku na vzrůstající napětí. Dochází k odvíjení vrstevnic od středu, kde je posunutí největší. Podle deformace proužků v některých pasážích je patrné, že průhyb je ovlivněn uchycením

vzorku. Samotný charakter prohnutí je však shodný s očekávaným. Při zvýšení napětí o 20 V došlo k posunutí o 1,2 μm .

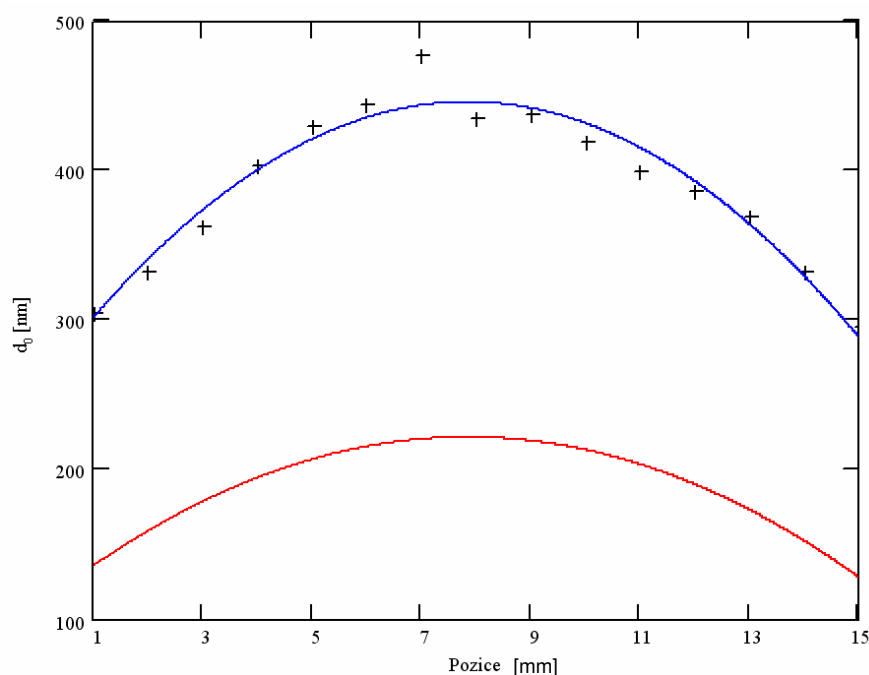
4.2.2. Měření pomocí skenování povrchu

Vzorek byl upnut do speciálního posuvného stolečku umožňujícího vertikální i horizontální posun. Povrch byl skenován křížem přes střed. Skenování v horizontálním směru probíhalo z levé strany a ve vertikálním od spodního okraje.

Z naměřených hodnot posunutí jsou vykresleny grafy. Naměřené hodnoty jsou proloženy křivkou. V grafech jsou vyneseny naměřené hodnoty reprezentované diskrétními body. Křivka, prokládající naměřené hodnoty, je zakreslena modrou barvou a červenou barvou je znázorněn průhyb bimorfu v ideálním případě podle odvozeného vzorce. Na vodorovné ose grafu je vynášeno číslo pozice, kde se skenuje. Vzdálenost mezi pozicemi je 1 mm.

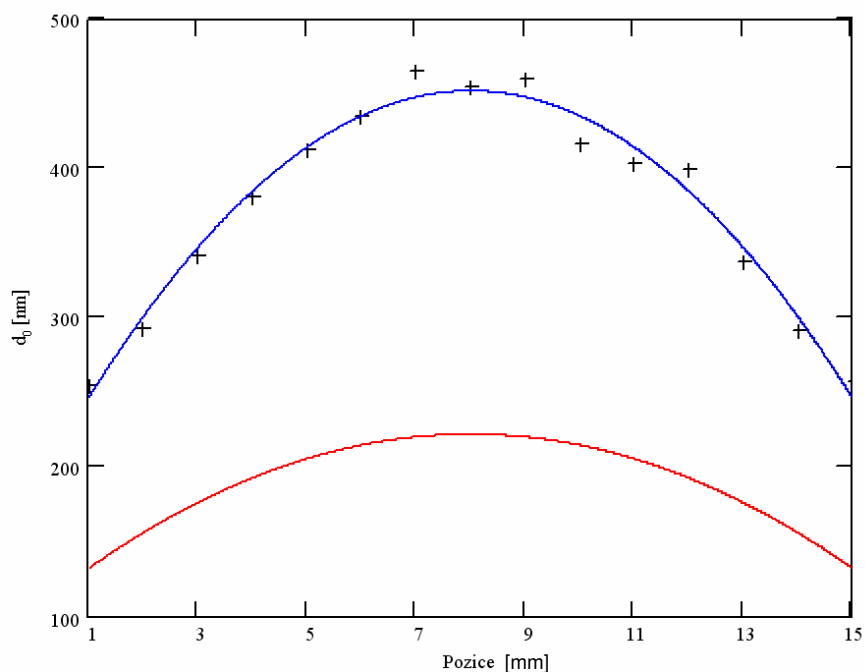
Vzorek 1:

Amplituda budícího napětí byla z důvodu větší tloušťky 40 V. To zajistilo výchylku i v krajních bodech. V obou směrech bylo naměřeno 15 hodnot.



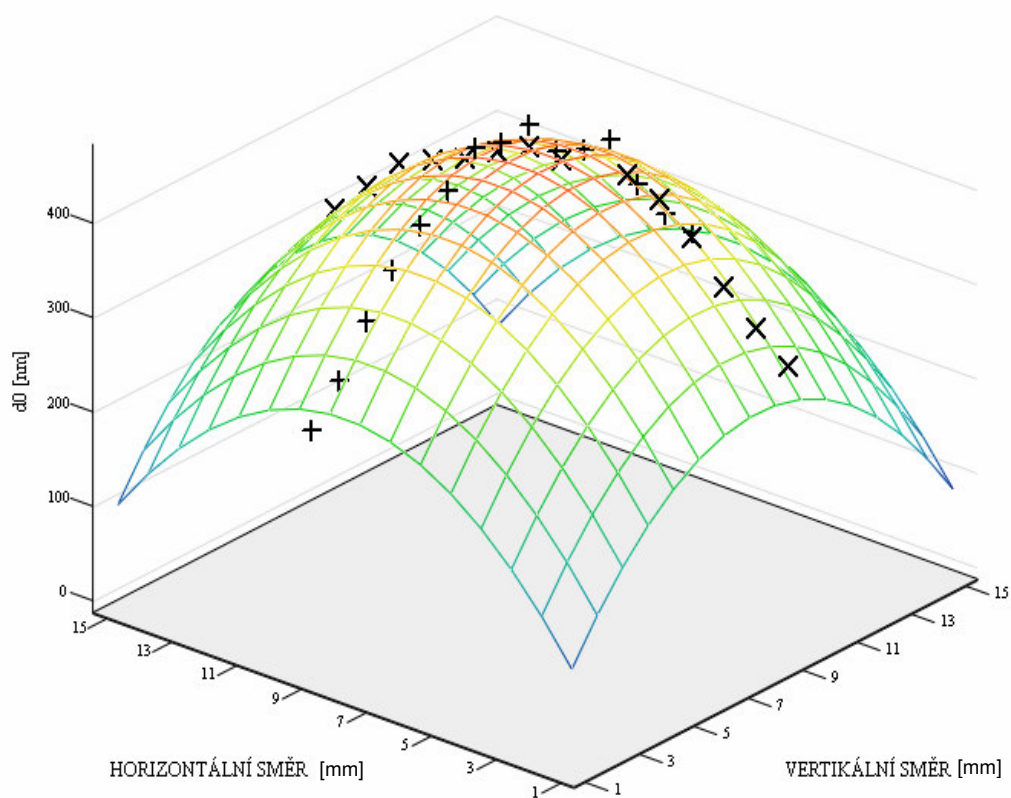
Graf 4.2 – Prohnutí vzorku 1 v horizontálním směru, experimentální a teoretická závislost

Rovnice proložení: $y = -3,076 \cdot x^2 + 48,202 \cdot x + 257,074$



Graf 4.3 – Prohnutí vzorku 1 ve vertikálním směru, experimentální a teoretická závislost

Rovnice křivky proložení: $y = -4,2 \cdot x^2 + 67,172 \cdot x + 183,179$

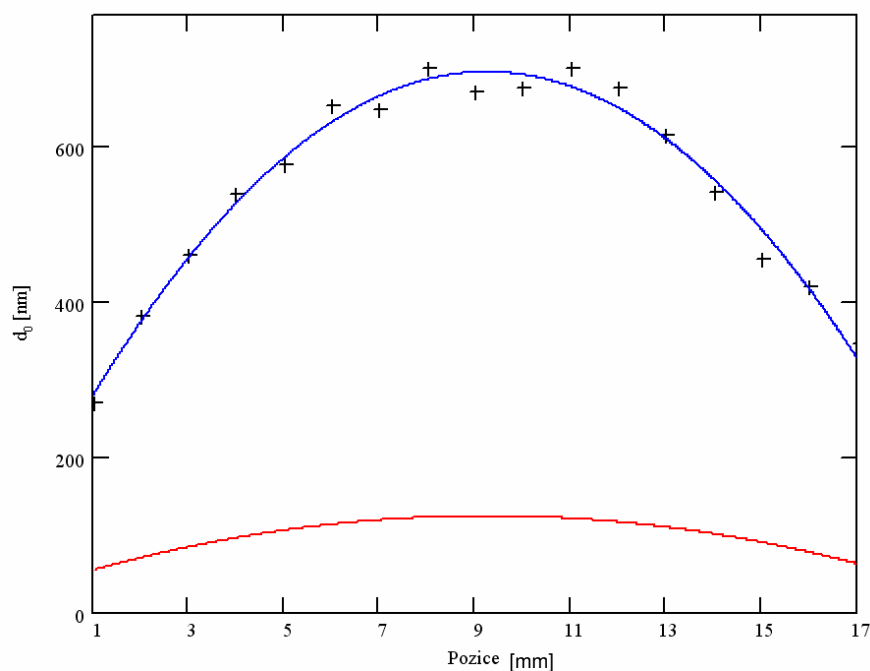


Graf 4.4 – Simulované prohnutí vzorku 1 s naměřenými hodnotami

Z analytického vyjádření aproximačních křivek lze zjistit, kde se přibližně nachází střed bimorfu a případné odchylky v upnutí. Naměřené hodnoty mají předpokládaný parabolický charakter. Zjištěné křivky protínají osu x přibližně v bodech, kde je vzorek přidržován O-kroužkem o poloměru 11 mm. Z toho je patrné, že byly dodrženy okrajové podmínky. Z naměřených hodnot se dá také vykreslit přibližný průhyb v trojrozměrném zobrazení (graf 4.4).

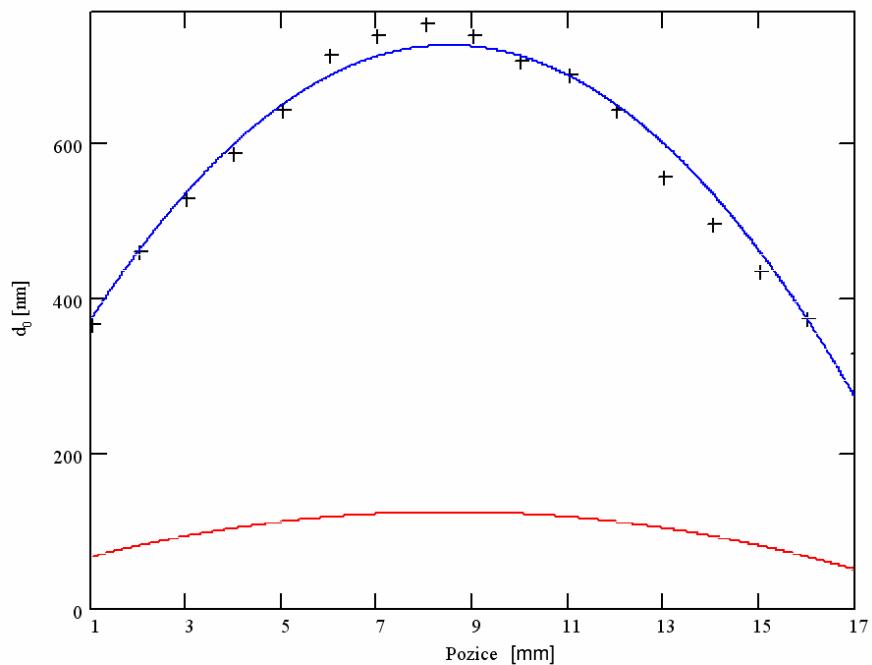
Vzorek 2:

Tento vzorek byl buzen signálem s amplitudou 10 V. Ve vodorovném i svislém směru proběhlo 17 měření. Tento vzorek je nejslabší a lze u něj předpokládat největší výchylku.



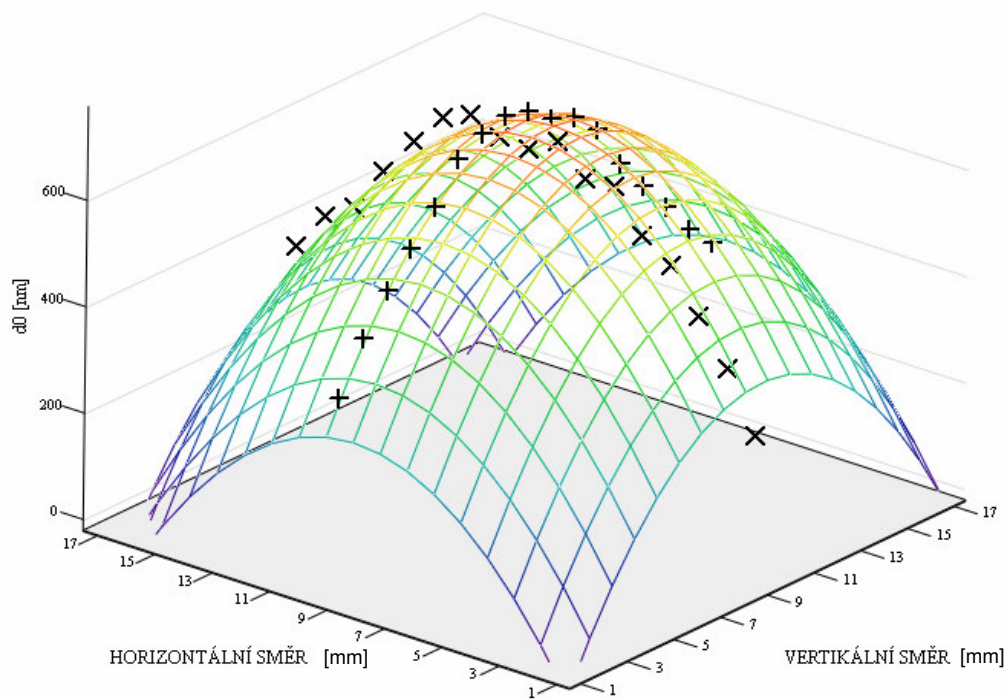
Graf 4.5 – Prohnutí vzorku 2 v horizontálním směru, experimentální a teoretická závislost

Rovnice křivky proložení: $y = -6,113 \cdot x^2 + 112,891 \cdot x + 174,553$



Graf 4.6 – Prohnutí vzorku 2 ve vertikálním směru, experimentální a teoretická závislost

Rovnice křivky proložení: $y = -6,272 \cdot x^2 + 106,428 \cdot x + 274,238$

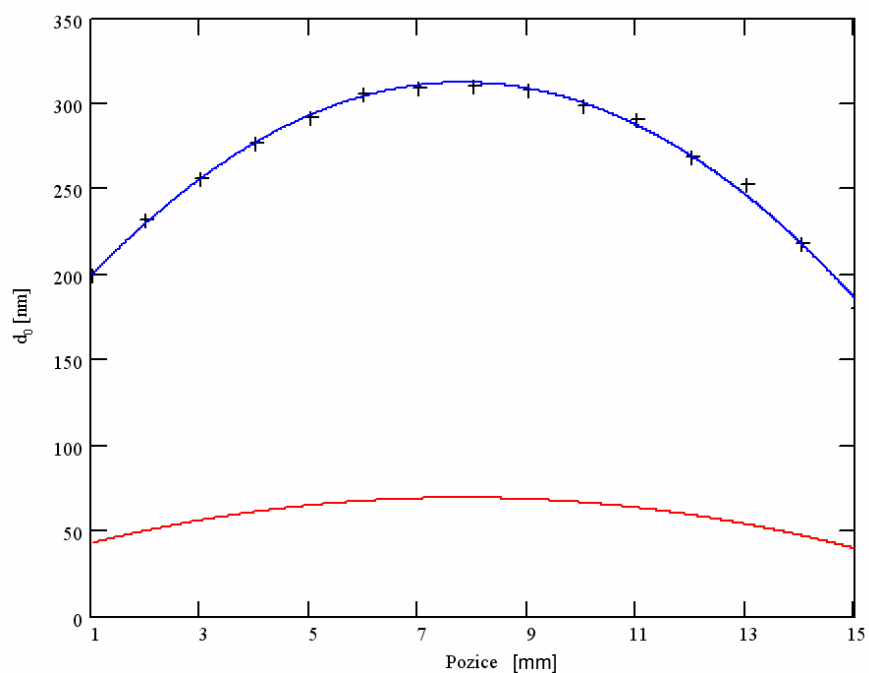


Graf 4.7 – Simulované prohnutí vzorku 2 s naměřenými hodnotami

U toho vzorku je také patrný charakteristický parabolický průhyb. Okrajové podmínky jsou téměř rovněž splněny. Ovšem rozdíl mezi naměřenými a vypočtenými hodnotami je výraznější. Naměřený průhyb je téměř šestinásobně větší.

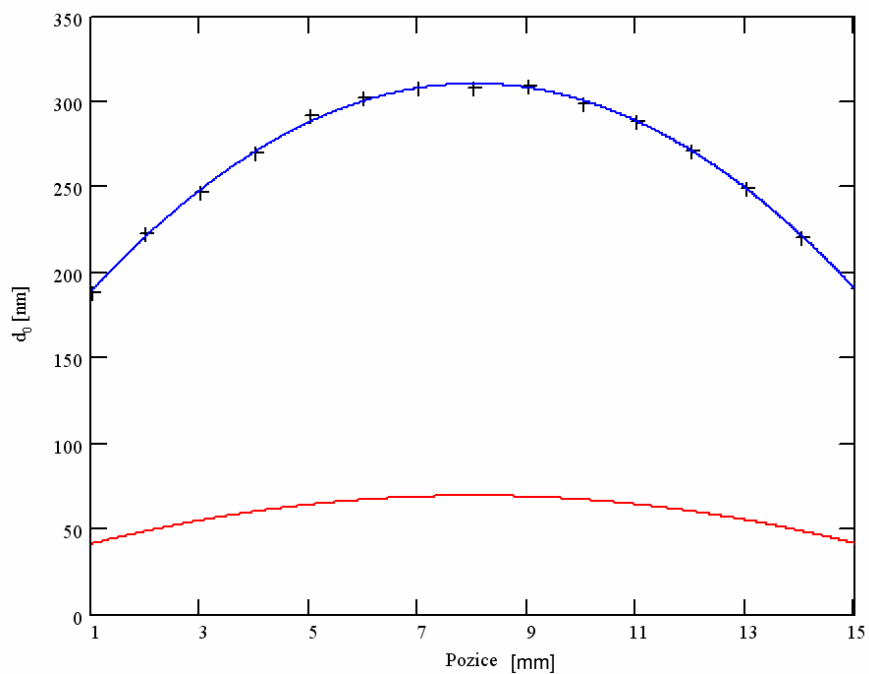
Vzorek 3:

Budící napětí má amplitudu 10 V a je naměřeno 15 hodnot v každém směru.



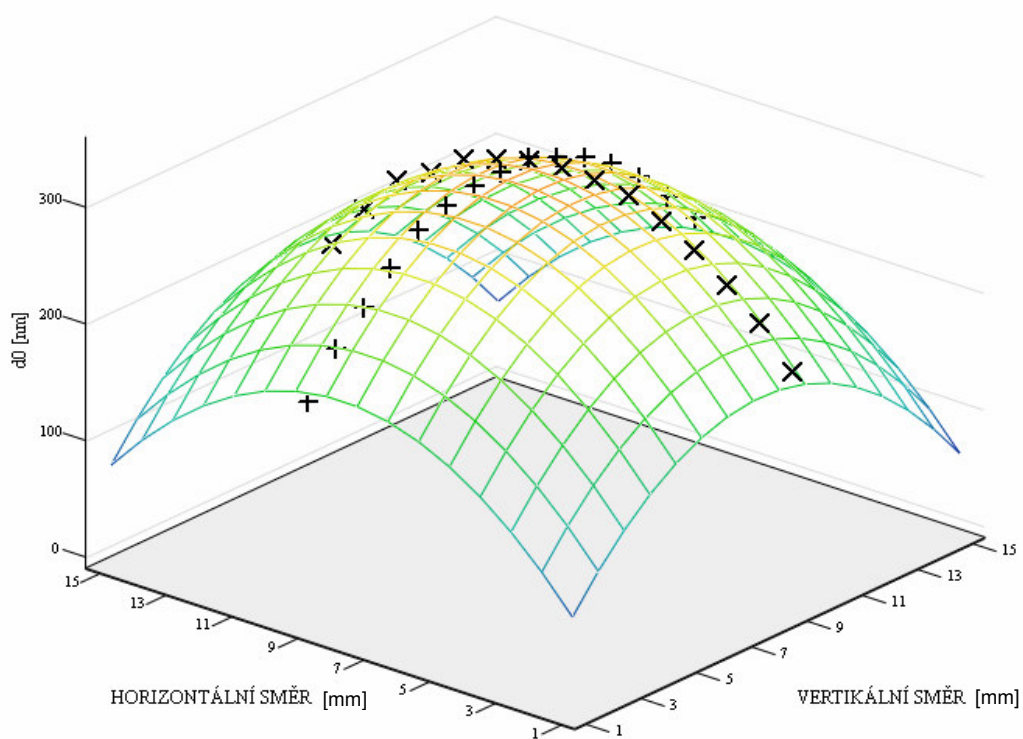
Graf 4.8 – Prohnutí vzorku 3 v horizontálním směru, experimentální a teoretická závislost

Rovnice křivky proložení: $y = -2,443 \cdot x^2 + 38,078 \cdot x + 163,943$



Graf 4.9 – Prohnutí vzorku 3 ve vertikálním směru, experimentální a teoretická závislost

Rovnice křivky proložení: $y = -2,466 \cdot x^2 + 39,482 \cdot x + 152,349$



Graf 4.10 – Simulované prohnutí vzorku 3 s naměřenými hodnotami

Hodnoty naměřené na tomto vzorku leží téměř všechny na aproximační křivce. Také okrajové podmínky jsou s velmi malou odchylkou splněny.

Naměřené hodnoty posunutí ve středu vzorku jsou zapsané v následující tabulce.

Číslo vzorku	$d_{0\max}$ [nm] horizontální směr	$d_{0\max}$ [nm] vertikální směr
1	480 ± 20	470 ± 20
2	700 ± 40	750 ± 40
3	310 ± 16	310 ± 16

Tabulka 4.2 – Naměřené maximální výchylky

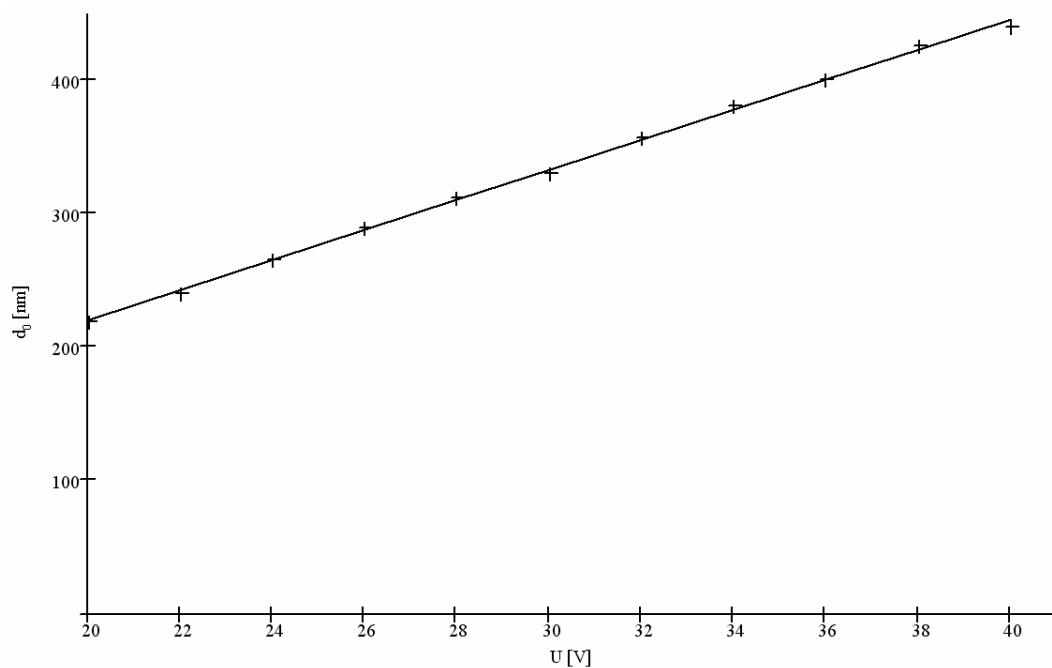
U všech měřených vzorků bylo potvrzeno, že výchylka klesá se vzdáleností od středu kvadraticky. Žádané okrajové podmínky byly splněny. Velké neshody se však projevily při porovnání naměřených a spočtených hodnot. Tyto odchylky mohou být způsobeny například:

- Nedostatečně kvalitním uchycením. Vzorek byl uchycen pomocí O-kroužku, který byl upnut v držáku pomocí tří šroubů. To může způsobovat nerovnoměrné rozložení síly, která vzorky svírá.
- Dodatečnou povrchovou úpravou vzorků. Broušením mohly vzniknout na povrchu slabé vrstvičky s rozdílným piezoelektrickým koeficientem. Tím se z plátku stane další bimorf. Po slepení pak vzniká polymorfy, který má mnohem větší posunutí.
- Různá teplotní roztažnost lepených částí. Po zatvrdnutí lepidla mohlo dojít k trvalému prohnutí, což se potvrdilo při měření Twyman-Greenovým interferometrem.

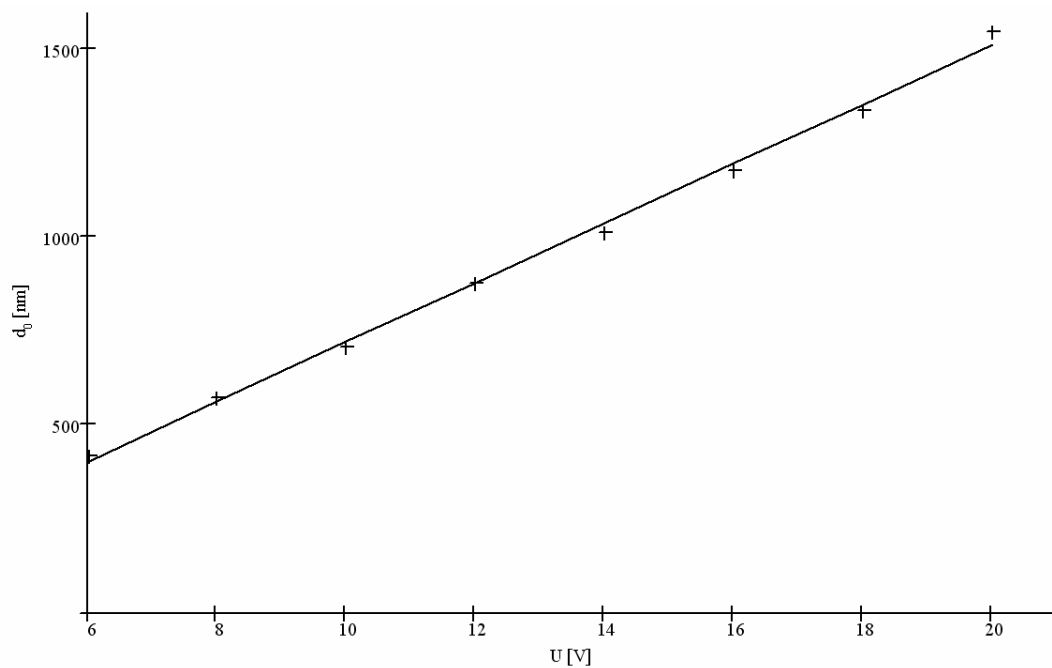
4.3. Napět'ová závislost průhybu bimorfu

Měřením mělo potvrdit lineární závislost průhybu na velikosti budícího napětí. Pokud by byla závislost nelineární, nemohly by se vzorky budit různým napětím, což by způsobovalo problémy u vzorku 3.

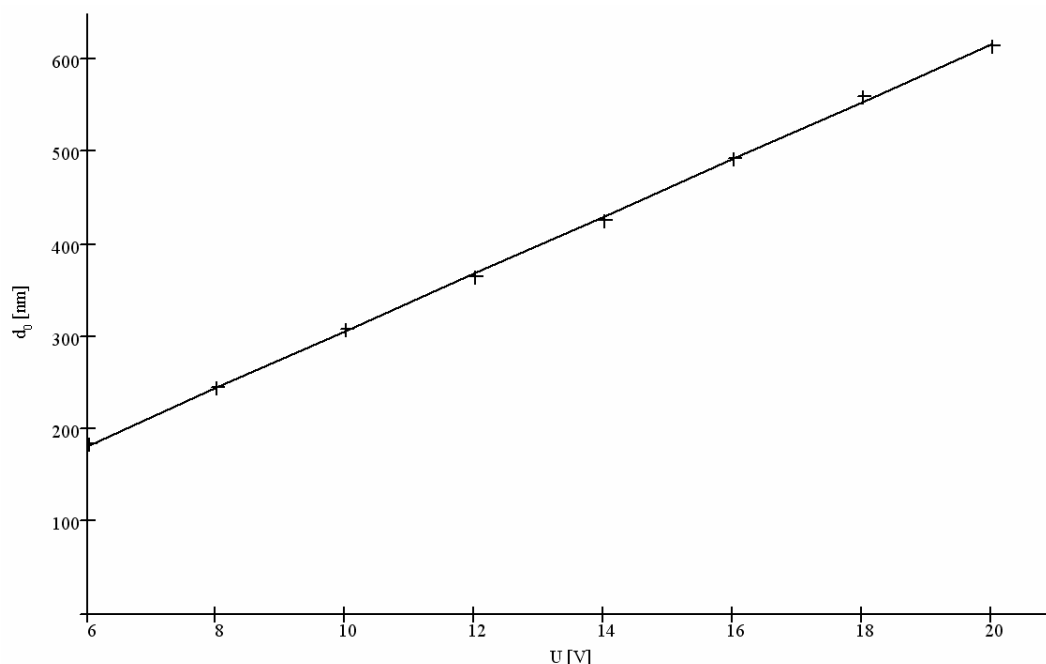
Velikost posunutí byla měřena uprostřed vzorku. Amplituda byla měněna s krokem 2 V. Pro vzorek 2 a 3 bylo zvoleno rozmezí od 6 V do 20 V, pro vzorek 1 se měnilo napětí od 20 V do 40 V.



Graf 4.11 – Napěťová závislost prohnutí vzorku 1
Rovnice přímky proložení: $y = 11,26 \cdot x - 5,601$



Graf 4.12 – Napěťová závislost prohnutí vzorku 2
Rovnice přímky proložení: $y = 79,185 \cdot x - 71,774$



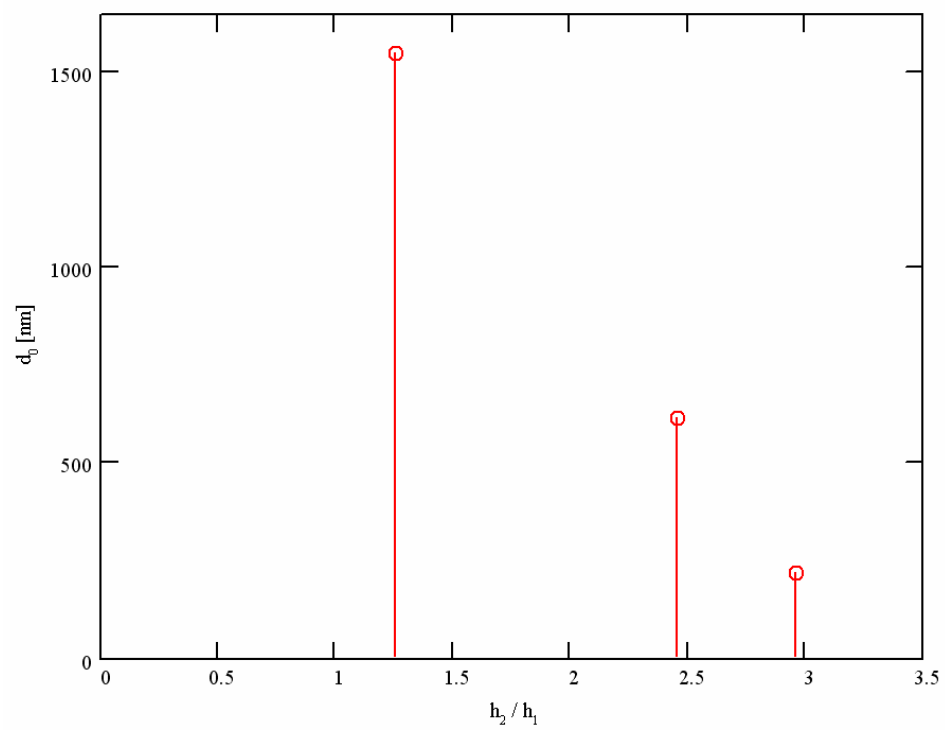
Graf 4.13 – Napěťová závislost prohnutí vzorku 3
Rovnice přímky proložení: $y = 30,999 \cdot x - 3,85$

Z grafů je vidět, že charakteristiky jsou skutečně lineární. Z rovnic aproximačních přímek lze určit, kde protíná osu x. Odchylka je přibližně 0,5 V. Přímka pro vzorek 3 téměř protíná osu x v nule.

Protože byly všechny vzorky měřeny pro stejné napětí 20 V (viz tabulka 4.3), lze vykreslit závislost prohnutí na poměru tloušťek plátků tvořících bimorf (graf 4.14). Z tohoto grafu je patrné, že čím menší je poměr tloušťek plátků a zároveň s ním i celková tloušťka bimorfu, je průhyb větší.

Číslo vzorku	h_2 / h_1	d_0 [nm]
1	2,95	220 ± 10
2	1,25	1550 ± 80
3	2,45	610 ± 30

Tabulka 4.3 – Výchyly v závislosti na poměru tloušťek



Graf 4.14 – Závislost prohnutí na poměru tloušťek plátků bimorfu

5. Závěr

Hlavním cílem práce bylo studium heterogenních kruhových bimorfů. Sestavila se tedy sady vzorků z PZT keramiky složených z plátek různých tloušťek. Na vzorcích se měřilo jejich prohnutí při přiloženém napětí, dále tloušťková roztažnost vzorků a závislost prohnutí na budícím napětí.

Z důvodu potřeby vysoké přesnosti používala se metoda laserové interferometrie. Pomocí modulů byly sestaveny dva druhy interferometrů. Pro měření tloušťkové změny vzorků byl použit dvoupaprskový Mach-Zehnderův interferometr. Data byla snímána a vyhodnocována pomocí počítače. Potvrdilo se, že tato změna nemá vliv na měření průhybu, neboť je prakticky zanedbatelná. Na měření posunutí byl použit Michelsonův interferometr ve standardní modifikaci. Dříve používané nastavení nebylo optimální pro měření posunutí bimorfu mezi 0,1 a polovinou vlnové délky. Toto se dalo obejít větším budícím napětím u vzorků, kde toto hrozilo. Dalším řešením mohla být konfigurace s použitím dvou detektorů. Ta se však ukázala v dostupných podmínkách velmi nestabilní a tudíž nepoužitelná.

Naměřené hodnoty se při porovnání se spočtenými podle odvozeného vzorce příliš neshodují. To je přisouzeno spojení plátek, které způsobilo prohnutí vzorku bez přiloženého napětí, uchycení vzorků a změně parametrů bimorfů při opracovávání.

Plošné snímání Twyman-Greenovým interferometrem bylo pouze ilustrační a nebylo řešeno žádné další vyhodnocování dat z této metody, což by bylo možné pomocí počítačové analýzy obrazu.

Piezoelektrické materiály se v dnešní době čím dál více uplatňují v různých technických odvětvích. Piezoelektrické bimorfy se mohou používat jako aktuátory nebo jako detektory tlaku a síly, a proto výzkum jejich vlastností může pomoci jejich rozšíření do řady technických aplikací.

Použitá literatura

- [1] ERHART, Jiří, *Piezoelektrické “chytré” materiály pro elektrotechniku, PZT keramika*, Elektro 11 (2002) 4-7
- [2] HIRŠL, Jindřich a kol., *Keramická piezoelektrika: vlastnosti a technické použití*, Praha : [s.n.], 1970, 93 s.
- [3] PŮLPÁN, Petr – ERHART, Jiří, *Parametry piezoelektrických bimorfů*, Elektro 3 (2002) 4-7
- [4] ADELMAN, N. T. – STAVSKY, Y., *Flexural-extensional behavior of composite piezoelectric circular plates*, J.Acoust.Soc.Am. 67, 3 (1980) 819-822
- [5] www.americanpiezo.com
- [6] ŠULC, M. – BURIANOVÁ, L., *Studium piezoelektrických dějů pomocí laserové interferometre*, Jemná mechanika a optika 10/01, 338-343
- [7] ŠULC, M., Twyman-Greenův interferometr - Výzkumná zpráva pro Crytur Turnov s.r.o., 2002

Příloha

Prohnutí bimorfu

Vzorek 1:

Pozice [mm]	1	2	3	4	5	6	7	8	9
d ₀ [nm]	304,23	332,35	262,84	403,57	429,89	444,38	476,51	434,62	437,02
Pozice [mm]	10	11	12	13	14	15			
d ₀ [nm]	418,52	399,49	385,85	369,63	332,35	295,15			

Měření na horizontále

Pozice [mm]	1	2	3	4	5	6	7	8	9
d ₀ [nm]	255,16	292,96	340,	380,29	411,98	434,62	465,29	454,60	459,88
Pozice [mm]	10	11	12	13	14	15			
d ₀ [nm]	416,32	403,57	399,49	338,03	290,81	256,82			

Měření na vertikále

Vzorek 2:

Pozice [mm]	1	2	3	4	5	6	7	8	9
d ₀ [nm]	270,89	380,29	459,88	538,1	577,37	653,72	648,36	700	670,34
Pozice [mm]	10	11	12	13	14	15	16	17	
d ₀ [nm]	676,07	700	676,07	613,18	541,78	454,6	420,74	346,93	

Měření na horizontále

Pozice [mm]	1	2	3	4	5	6	7	8	9
d ₀ [nm]	366,2	459,88	527,33	585,93	643,09	712,61	739,25	753,33	739,25
Pozice [mm]	10	11	12	13	14	15	16	17	
d ₀ [nm]	706,25	687,83	643,09	557,04	494,38	434,62	373,11	326,86	

Měření na vertikále

Vzorek 3:

Pozice [mm]	1	2	3	4	5	6	7	8	9
d ₀ [nm]	199,69	232,07	256,04	276,97	292,06	305,31	309,00	309,90	307,69
Pozice [mm]	10	11	12	13	14	15			
d ₀ [nm]	298,98	290,29	269,34	253,22	218,62	179,87			

Měření na horizontále

Pozice [mm]	1	2	3	4	5	6	7	8	9
d ₀ [nm]	188,61	222,33	246,64	270,45	291,68	301,69	307,45	308,34	309,14
Pozice [mm]	10	11	12	13	14	15			
d ₀ [nm]	299,07	287,98	271,21	248,98	220,97	190,93			

Měření na vertikále

Závislost posunutí na napětí

Vzorek 1:

U [V]	20	22	24	26	28	30
d ₀ [nm]	218,51	239,70	265,44	288,69	311,42	329,58
U [V]	32	34	36	38	40	
d ₀ [nm]	356,31	380,29	399,49	425,27	439,44	

Vzorek 2:

U [V]	6	8	10	12	14	16	18	20
d ₀ [nm]	420,74	573,19	706,25	878,89	1014,10	1180,60	1340,68	1550,98

Vzorek 3:

U [V]	6	8	10	12	14	16	18	20
d ₀ [nm]	183,54	244,81	307,36	364,89	425,44	492,96	559,77	614,36